

余文正, 吴宗谦, 杨瑞欣, 等. 基于《建筑抗震设计规范》强度包线函数参数取值研究[J]. 地震工程学报, 2022, 44(5): 1151-1159. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20210608006

YU Wenzheng, WU Zongqian, YANG Ruixin, et al. Parameter determination of intensity envelope function based on the *code for seismic design of buildings* [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(5): 1151-1159. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20210608006

基于《建筑抗震设计规范》强度包线函数 参数取值研究

余文正¹, 吴宗谦¹, 杨瑞欣², 兰 香¹

(1. 昆明学院 建筑工程学院, 云南 昆明 650214; 2. 云南国土资源职业学院, 云南 昆明 652501)

摘要: 利用《中国地震动参数区划图》采用的地震动参数衰减关系, 以及《中国地震动参数区划图》中地震动峰值加速度和地震动加速度反应谱特征周期反推不同设防烈度和设计地震分组对应的震级和震中距, 再根据《建筑抗震设计规范》中各设防水准的峰值加速度确定对应的震级和震中距, 进而根据地震动强度包线参数与震级和震中距关系计算地震动强度包线参数的取值, 为基于强度包线函数生成人工地震动提供参考, 并讨论强度包线参数的取值规律: (1) 随着设防烈度的提高, 加速度时程曲线上上升段持续时间 t_1 和平稳段持续时间 t_s 减小, 下降段衰减指数 c 增大; (2) 随着地震水准和设计地震分组的提高, 加速度时程曲线上上升段持续时间 t_1 和平稳段持续时间 t_s 增加, 下降段衰减指数 c 减小; (3) 在生成人工地震动时, 除考虑峰值加速度和设计地震分组影响外, 还需要考虑设防烈度影响。

关键词: 人工地震动; 强度包线函数; 震级; 震中距; 地震动持时

中图分类号: TU352

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2022)05-1151-09

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20210608006

Parameter determination of intensity envelope function based on the *code for seismic design of buildings*

YU Wenzheng¹, WU Zongqian¹, YANG Ruixin², LAN Xiang¹

(1. School of Construction Engineering, Kunming University, Kunming 650214, Yunnan, China;

2. Yunnan Land and Resources Vocational College, Kunming 652501, Yunnan, China)

Abstract: On the basis of the attenuation relation of ground motion parameters, the peak ground acceleration, and the characteristic period of seismic acceleration response spectrum adopted in the *Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China*, the magnitude and epicentral distance corresponding to different fortification intensity and design earthquake classification were deduced in this paper. Then, the corresponding magnitude and epicentral distance were determined according to the peak acceleration of each fortification level given by the *Code for Seismic*

收稿日期: 2021-06-08

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目(2020J0512); 昆明学院引进人才科研项目(YJL2106); 云南省教育厅科学研究基金项目(2020J0511); 云南省大学生创新创业训练计划项目(202111393006)

第一作者简介: 余文正(1985—), 男, 讲师, 博士, 主要从事结构工程及工程抗震。E-mail: 254810607@qq.com。

Design of Buildings. Finally, the value of the intensity envelope function was calculated according to its relation with the magnitude and epicentral distance, thus providing a reference for generating artificial ground motions based on the intensity envelope function. The parameter determination rule of intensity envelope function was also discussed: (1) With the increase in the fortification intensity, the rising duration t_1 and the stable duration t_s of the acceleration time-history curve decrease, and the attenuation index c increases; (2) With the increase in the ground motion intensity and design earthquake classification, t_1 and t_s increase, and c decrease; (3) When generating artificial ground motion, the influence of fortification intensity should also be considered aside from the influence of peak acceleration and design earthquake classification.

Keywords: artificial ground motion; intensity envelope function; magnitude; epicentral distance; ground motion duration

0 引言

随着减隔震技术在建筑结构中的广泛应用,弹塑性时程分析方法在结构设计中也得到了充分的利用。但是,由于地震波的频谱成分有差异,使得时程分析中不同地震波作用下结构的地震响应有一定差异^[1]。与天然波相比,人工波与目标反应谱匹配较好,且离散性要远小于天然地震波^[2]。基于此,很多学者采用人工波进行抗震研究^[3-5],并且相关国家标准规范也要求采用时程分析时,必须用符合要求的人工合成地震动进行抗震验算^[6-7]。不过,当结构进入弹塑性阶段时,结构地震反应的最大值不完全受输入地震动反应谱的控制^[8],即便地震动的反应谱非常接近,如果地震动持时不同,其对非线性体系分析的结果也同样有较大的差别^[9-10]。由于地震动强度包线函数反映了地震动峰值时刻出现的早晚和能量的集中程度,描述了地震波幅值上升和衰减的过程^[11],同时对地震动的强震持续时间和总持时起着控制作用。因此,有学者提出在合成人工地震动时不仅要符合目标功率谱,还要符合目标包线函数^[12]。可见,地震动强度包线函数的研究对弹塑性时程分析有着重要的意义。

霍俊荣等^[13]根据美国 457 条强震记录的分析结果,研究了地震动强度包线参数随震级、震中距的衰减规律,并通过回归分析,得到了地震动强度包线参数与震级和震中距的具体关系表达式。屈铁军等^[14]及钟菊芳等^[15]利用 SMART-1 台阵记录的 312 条强震记录,研究了强度峰值因子、衰减系数、上升段和强震平稳段的时间分界点和强震平稳段和衰减段的时间分界点的取值与对应测点的坐标值、测点位置土层厚度的关系,并拟合得到相关表达式。董银峰等^[16]利用 2011 年东日本大地震强震记录,

并采用双平稳强度包线模型,建立了加速度时程强度包线函数参数的衰减关系和记录台站的空间分布特征。林建生等^[17]探讨了水平加速度峰值和征周期值随强度包线函数参数的变化趋势。肖亮^[18]根据美国的 304 条强震记录,采用三段式强度包线函数模型,建立了我国基岩场地条件下水平向加速度时程强度包线函数参数的衰减关系。张美玲等^[19]利用我国 2007—2013 年之间发生的 12 次地震的 231 条基岩强震记录并采用三段式强度包线函数模型,建立了我国基岩场地条件下水平向和竖直向加速度时程强度包线函数参数的衰减关系。

以上关于地震动强度包线函数的研究成果大部分是给出强度包线参数与震中距、震级的关系,需要明确具体的震级和震中距后,才能确定强度包线参数的具体取值,对于大多数建设项目而言,较难获得建设场地的震中距和震级。因此,这些研究成果在大部分建设项目中很难得到实质性的应用。当然,也有部分学者给出了地震动强度包线参数的具体取值,如董娣^[20]根据欧洲 163 组强震记录,分析了地震动强度包线函数的统计特性,并采用胡聿贤和周锡元强度包线模型,根据不同场地类别给出了包线函数参数的具体取值。董银峰^[21]利用 5 700 余条地震记录,分析了强度包线参数的多维相关性及其衰减规律,并根据设防烈度、地震分组和场地类别的不同,分别给出了强度包线参数的设计取值建议。李英民等^[22]根据 703 组强震记录的分析结果,研究了地震动强度包线参数随震级、震中距和反应谱特征周期的衰减规律,并根据设防烈度、场地类别和近震远震的不同,给出了一维和三维地震动强度包线参数的建议取值。曹国安等^[23]对强度包线函数的研究转化为对地震记录标准差的研究,通过对美国近

千条地震记录的标准差的统计计算,给出了具体的强度包线函数。这些关于强度包线参数具体取值的研究成果推广了强度包线函数在人工合成地震动的应用,具有重要的工程意义。

从现阶段研究成果可以看出,地震动强度包线参数的确定均是根据研究者选择的强震记录分析所得。本文将从另一个角度,利用《中国地震动参数区划图》^[24](下文简称《区划图》)中采用的地震动参数衰减关系,以及《区划图》中地震动峰值加速度和地震动加速度反应谱特征周期反推不同设防烈度和地震分组对应的震级和震中距,再根据《建筑抗震设计规范》^[25](下文简称《抗规》)中各设防水准的峰值加速度确定了《抗规》中不同设计烈度、不同设防水准以及不同地震分组对应地震动强度包线参数的取值。

1 基本思路

强度包线函数采用较常用的三段式模型,包含上升、平稳和下降段,如图 1 及式(1)所示。

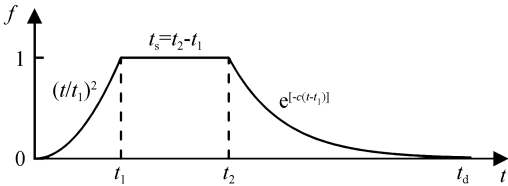


图 1 三段式强度包线函数示意图

Fig.1 Schematic diagram of three-segment intensity envelope function

$$f(t)=\begin{cases} (t/t_1)^2 & 0\leq t<t_1 \\ 1 & t_1\leq t<t_2 \\ e^{-c(t-t_2)} & t_2\leq t<t_d \end{cases} \quad (1)$$

图 1 和式(1)中 $f(t)$ 为强度包线函数,参数 t_1 为强度包线平稳段起点,亦即上升段持时, t_2 为强度包线平稳段终点, t_s 为平稳段持时,即 $t_s=t_2-t_1$, c 为下降段衰减指数, e 为自然常数, t_d 为总记录时间。研究表明:参数 t_1 、 t_2 (或 t_s) 和 c 一般为震级和震中距的函数。

《区划图》给出了中国地震动峰值加速度和中国地震动加速度反应谱特征周期,而这两个参数均是关于震级和震中距的函数。因此,可以根据《区划图》中各地区地震动峰值加速度和特征周期的取值反算各地区对应的震级和震中距,再假定同一地区对应的震中距相同,不同地震水准由震级的大小决定,进而可求得各地区在不同地震水准作用下的强

度包线函数取值,基本思路如图 2 所示。

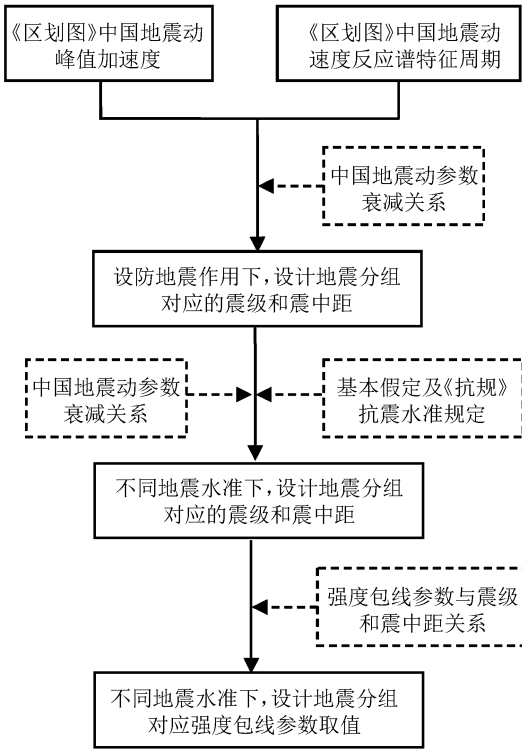


图 2 强度包线参数计算流程图

Fig.2 Calculation flow chart of intensity envelope parameters

2 设防地震震级和震中距确定

根据文献[26]可知,《区划图》中中国地震动参数衰减关系模型为:

$$\lg Y=A+B M+C \lg (R+D e^{E M}) \quad (2)$$

式中: Y 为地震动参数; α_E 和 v_E 分别为峰值加速度 (cm/s^2) 和峰值速度 (cm/s); M 为面波震级; R 为震中距 (km); A 、 B 、 C 、 D 和 E 为回归系数,其数据如表 1 和表 2 所列,表中 σ 为标准差。

表 1 α_E 衰减关系系数

Table 1 Coefficients of attenuation relationship of α_E						
系数与标准差	A_α	B_α	C_α	D_α	E_α	σ_α
$M \leq 6.5$	0.561	0.746	-1.925	0.956	0.462	0.236
$M \geq 6.5$	2.501	0.448	-1.925	0.956	0.462	

表 2 v_E 衰减关系系数

Table 2 Coefficients of attenuation relationship of v_E						
系数与标准差	A_v	B_v	C_v	D_v	E_v	σ_v
$M \leq 6.5$	-1.819	0.879	-1.731	0.956	0.462	0.271
$M \geq 6.5$	0.425	0.533	-1.731	0.956	0.462	

$$T_g=2 \pi \frac{v_E}{\alpha_E} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)中,可得

$$T_g=2\pi\,10^{A_T+B_TM+C_T\lg(R+D_Te^{ETM})}\tag{4}$$

式中: $A_T=A_v-A_a$ 、 $B_T=B_v-B_a$ 、 $C_T=C_v-C_a$ 、 $D_T=D_v=D_a$ 、 $E_T=E_v=E_a$,其数据如表 3 所列。

表 3 特征周期 T_g 计算系数

Table 3	Calculation coefficients of characteristic period T_g				
系数与 标准差	A_T	B_T	C_T	D_T	E_T
$M\leqslant6.5$	-2.380	0.133	0.194	0.956	0.462
$M\geqslant6.5$	-2.076	0.085	0.194	0.956	0.462

根据文献[27]可知,《抗规》和《区划图》中抗震设防烈度和设计基本地震加速度的对应关系,以及设计地震分组与特征周期对应关系如表 4 和表 5 所列。

表 4 抗震设防烈度和设计基本地震加速度的对应关系

Table 4	Corresponding relationship between seismic fortification intensity and design basic acceleration of ground motion			
抗震设计烈度	6	7	8	9
设计基本地震动加速 /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	50	100(150)	200(300)	400

表 5 设计地震分组和特征周期对应关系

Table 5	Corresponding relationship between seismic design group and characteristic period	
设计地震分组	特征周期 T_g/s (Ⅱ类场地)	
第一组	0.35	
第二组	0.40	
第三组	0.45	

根据表 1~5 以及式(2)、(3)即可求得各设防地震作用下,不同设计地震分组对应的震级和震中距。例如抗震设防烈度为 6 度、设计地震分组为第一组时,震级和震中距计算过程如下:

当 $M < 6.5$ 时

$$\begin{cases} 2\pi 10^{-2.380+0.133M+0.194\lg(R+0.956e^{0.462M})}=0.35 \\ 0.561+0.746M-1.925\lg(R+0.956e^{0.462M})=\lg(50) \end{cases}\tag{5}$$

当 $M \geqslant 6.5$ 时

$$\begin{cases} 2\pi 10^{-2.076+0.085M+0.194\lg(R+0.956e^{0.462M})}=0.35 \\ 2.501+0.448M-1.925\lg(R+0.956e^{0.462M})=\lg(50) \end{cases}\tag{6}$$

解上述方程可得:

$$M=5.96,\quad R=37.26$$

同理可以得到各设防烈度下设计地震分组对应的震级和震中距,如表 6 所列。

上述求解过程亦可用图形表示,即在设防地震峰值加速度和特征周期关于震中距和震级的曲线图中,等加速度与等特征周期的交点坐标即为设防烈

度和设计地震分组对应的震中距和震级,如图 3 所示。

表 6 设防地震各设计地震分组震级及震中距

Table 6	Magnitudes and epicentral distances of fortification earthquakes in each seismic design group			
抗震设计烈度	参数类型 地震分组	设防地震		
		第一组	第二组	第三组
6(0.05g)	加速值	50		
	M	5.96	6.24	6.48
	R	37.26	49.95	64.33
7(0.10g)	加速值	100		
	M	6.1	6.38	6.77
	R	25.48	34.99	46.59
7(0.15g)	加速值	150		
	M	6.19	6.47	6.9
	R	19.6	27.55	36.39
8(0.20g)	加速值	200		
	M	6.25	6.61	7
	R	15.83	23.55	29.79
8(0.30g)	加速值	300		
	M	6.34	6.74	7.14
	R	10.98	16.61	21.26
9(0.40g)	加速值	400		
	M	6.4	6.84	7.23
	R	7.85	12.08	15.7

注:表中 M 为面波震级;R 为震中距,单位为 km;加速度单位为 cm/s^2 。

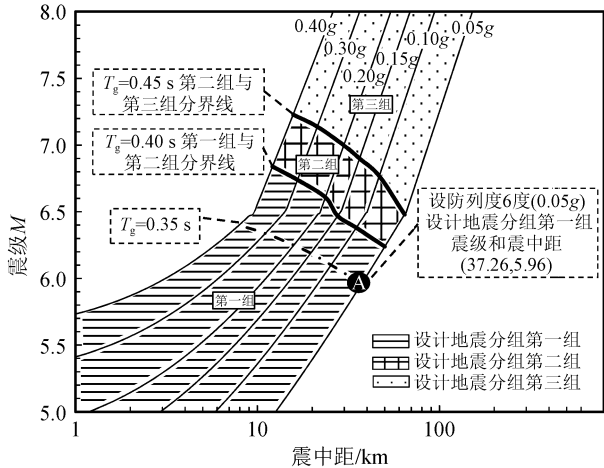


图 3 震级及震中距图解法

Fig.3 Illustration method of magnitude and epicentral distance

图 3 中加速度为 $0.05g$ 的曲线与特征周期为 0.35 s 的曲线交点 A 点,其坐标 A (37.26, 5.96),表示《区划图》中峰值加速度为 $0.05g$,特征周期为 0.35 s ,对应的震中距为 37.26 km 和震级为 5.96 。

从表 6 和图 3 中可以看出,随着震级增加,震中距减小,设防地震峰值加速度增加,亦即设防烈度增加;随着震级和震中距的增加,地震分组增加。

3 不同地震水准震级和震中距确定

在抗震设计时,除了分析设防地震作用在下结构的响应,还需要分析多遇地震和罕遇地震作用下结构的响应,因此,需要明确各地震水准下的震级和震中距。

对于同一地区的多遇地震和罕遇地震而言,其与设防地震的差别主要是震级大小不同,因此,假定在多遇地震和罕遇地震作用下,震中距与设防地震震中距相同。从而根据多遇地震和罕遇地震的峰值加速大小,以及中国地震动参数衰减关系,即式(2),可以确定多遇地震和罕遇地震的震级。

例如,8 度(0.20g)罕遇地震,设计地震分组为第二组的震中距和震级计算过程:

先查表 6,8 度(0.20g)设防地震作用下,设计地震分组为第二组的震中距 R 为 23.55 km,根据假

定,罕遇地震作用下,震中距同样取震中距 R 为 23.55 km。

根据《抗规》可知,8 度(0.20g)罕遇地震对应的峰值加速度为 400 cm/s^2 ,根据式(2)及表 1,可得当 $M < 6.5$ 时

$$0.561 + 0.746M - 1.925\lg(23.55 + 0.956e^{0.462M}) = \lg(400) \quad (7)$$

当 $M \geq 6.5$ 时

$$2.501 + 0.448M - 1.925\lg(23.55 + 0.956e^{0.462M}) = \lg(400) \quad (8)$$

解上述方程可得:

$$M = 7.85$$

因此,8 度(0.20g)罕遇地震,设计地震分组为第二组的震中距为 23.55 km 和震级为 7.85。

按照该方法可以求得各水准地震作用下震级和震中距如表 7 所列。

表 7 各地震水准作用下震级与震中距取值

Table 7 Values of magnitude and epicentral distance under various earthquake levels

抗震设计烈度	参数类型 地震分组	多遇地震			设防地震			罕遇地震		
		第一组	第二组	第三组	第一组	第二组	第三组	第一组	第二组	第三组
6	加速值		18			50		125		
	M	5.27	5.56	5.82	5.96	6.24	6.48	6.68	7.19	7.63
	R	37.26	49.95	64.33	37.26	49.95	64.33	37.26	49.95	64.33
7 0.10g	加速值		35			100		220		
	M	5.36	5.66	5.93	6.1	6.38	6.77	6.89	7.42	7.90
	R	25.48	34.99	46.59	25.48	34.99	46.59	25.48	34.99	46.59
7 0.15g	加速值		55			150		310		
	M	5.44	5.75	6	6.19	6.47	6.9	7.07	7.61	8.00
	R	19.6	27.55	36.39	19.6	27.55	36.39	19.60	27.55	34.77
8 0.20g	加速值		70			200		400		
	M	5.44	5.78	5.99	6.25	6.61	7	7.24	7.85	8.00
	R	15.83	23.55	29.79	15.83	23.55	29.79	15.83	23.55	25.64
8 0.30g	加速值		110			300		510		
	M	5.51	5.82	6.02	6.34	6.74	7.14	7.28	7.86	8.00
	R	10.98	16.61	21.26	10.98	16.61	21.26	10.98	16.61	18.00
9	加速值		140			400		620		
	M	5.47	5.77	5.96	6.4	6.84	7.23	7.37	7.92	8.00
	R	7.85	12.08	15.7	7.85	12.08	15.7	7.85	12.08	12.52

注:由于式(1)建议适用范围为 $M=4.5\sim 8,R=0\sim 200\text{ km}$ 。因此,当 M 超过 8 时,本文取 $M=8$,进而计算 R ,实际上按照本文方法计算出来的 M 最大值为 8.27,对应 9 度罕遇地震,设计地震分组第三组,差别不到 3.4%,而且超过 8 的情况非常少。

4 强度包线参数取值

现有强度包线参数一般为震级和震中距的函数,因此,根据上节确定的各地震水准下震级与震中距取值,即可确定强度包线参数的取值。本文选取文献[19]中提出的中国大陆地区地震动时程强度包线函数衰减关系来确定强度包线参数取值,其强度包线函数衰减关系为:

$$\lg Y = c_1 + c_2 M + c_3 \lg(R + R_0) \quad (9)$$

式中: Y 表示强度包线参数 $t_1, t_s, c, t_s = t_2 - t_1$,各参数意义同式(1) 和图 1 中参数意义。

M 表示面波震级, R 表示震中距, R_0 表示与震级相关的近场距离饱和因子,取 10 km, c_1, c_2, c_3 为回归系数,其数值如表 8 所列,表中 σ 为标准差。

将表 7 和表 8 中的数据代入式(9)中,可以得到多遇、设防及罕遇地震作用下地震动强度包线参数,如表 9 所列。

当结构所处地区的抗震设防烈度以及设计地震

分组确定后,即可根据表 9 中强度包线参数生成各个水准地震下的人工波进行抗震时程分析。

表 8 强度包线函数相关参数的回归系数

Table 8 Regression coefficients of relevant parameters of intensity envelope function

强度包线参数	c_1	c_2	c_3	σ
t_1	-1.987	0.200	0.786	0.102
t_s	-2.349	0.304	0.683	0.085
c	1.477	-0.222	-0.429	0.032

5 参数取值规律

为了分析各设防烈度、设防水准和设计地震分组

下,强度包线参数的取值规律,本节将表 9 中数据以图形形式表达,如图 4~6 所示。

从图 4~6 中可以看出:(1)总体上,相同设防水准和设计地震分组下,上升段持续时间 t_1 和平稳段持续时间 t_s 随着设防烈度的提高而减小,下降段衰减指数 c 随着设防烈度提高而增加。根据式(9)可知,上升段持续时间 t_1 和平稳段持续时间 t_s 均是随着震级和震中距的增加而增加,下降段衰减指数 c 随着震级和震中距的增加而减小,而设防烈度提高时,震级增加,震中距减小。因此,总体上看,震中距对持时的影响要大于震级对持时的影响。

表 9 强度包线参数取值

Table 9 Values of intensity envelope parameters

抗震设计 烈度	参数类型 地震分组	多遇地震			设防地震			罕遇地震			
		第一组	第二组	第三组	第一组	第二组	第三组	第一组	第二组	第三组	
6	加速值		18			50			125		
	强度包线 参数	t_1	2.42	3.33	4.44	3.32	4.55	6.02	4.63	7.05	10.23
		t_s	2.49	3.59	4.99	4.04	5.78	7.92	6.70	11.25	17.74
		c	0.39	0.30	0.24	0.27	0.21	0.17	0.19	0.13	0.10
7 0.10g	加速值		35			100			220		
	强度包线 参数	t_1	2.01	2.78	3.77	2.83	3.88	5.55	4.07	6.26	9.35
		t_s	2.18	3.17	4.48	3.66	5.24	8.06	6.38	10.86	17.78
		c	0.42	0.32	0.26	0.29	0.22	0.17	0.19	0.13	0.09
7 0.15g	加速值		55			150			310		
	强度包线 参数	t_1	1.81	2.52	3.33	2.56	3.50	5.04	3.83	5.92	8.14
		t_s	2.04	2.98	4.10	3.45	4.94	7.70	6.37	10.96	16.24
		c	0.43	0.33	0.27	0.30	0.23	0.17	0.19	0.13	0.10
8 0.20g	加速值		70			200			400		
	强度包线 参数	t_1	1.63	2.33	2.94	2.36	3.42	4.68	3.73	6.06	6.80
		t_s	1.86	2.82	3.67	3.28	5.04	7.44	6.57	12.01	13.90
		c	0.46	0.35	0.29	0.30	0.23	0.17	0.18	0.12	0.11
8 0.30g	加速值		110			300			510		
	强度包线 参数	t_1	1.43	1.98	2.47	2.09	3.03	4.13	3.21	5.07	5.63
		t_s	1.69	2.48	3.18	3.03	4.71	6.96	5.83	10.32	11.79
		c	0.49	0.37	0.32	0.32	0.23	0.18	0.20	0.13	0.12
9	加速值		140			400			620		
	强度包线 参数	t_1	1.23	1.67	2.06	1.89	2.74	3.69	2.96	4.50	4.74
		t_s	1.47	2.10	2.67	2.83	4.45	6.48	5.58	9.48	10.16
		c	0.53	0.42	0.35	0.33	0.24	0.18	0.20	0.14	0.13

注:表中 t_1 和 t_s 单位为 s;加速度单位为 cm/s^2 。

(2) 同一设防烈度和设计地震分组下,多遇地震、设防地震及罕遇地震对应的强度包线参数各不相同,随着设防水准的提高,上升段持续时间 t_1 和平稳段持续时间 t_s 增加,下降段衰减指数 c 减小。因此,在抗震分析时,不应应对多遇地震作用下生成的地震波进行数值上的缩放来获得设防或是罕遇地震作用所需的地震波。

(3) 同一设防烈度和设防水准下,设计地震分组越高,上升段持续时间 t_1 和平稳段持续时间 t_s 越长,下降段衰减指数 c 越小。

《抗规》中 8 度(0.20g)罕遇地震和 9 度(0.40g)设防地震的峰值加速度相同,均为 400 cm/s^2 ,从图 7 中可以看出,即便峰值加速度相同,设计地震分组相同,设防烈度不同时,其强度包线参数仍然有较大差别,因此,在抗震分析生成人工波时,不能仅依据峰值加速度和设计地震峰值生成人工波,还需要考虑设防烈度的影响。

6 结论

利用《中国地震动参数区划图》采用的地震动参

数衰减关系,以及《中国地震动参数区划图》中地震动峰值加速度和地震动加速度反应谱特征周期反推不同设防烈度和设计地震分组对应的震级和震中距,再根据《建筑抗震设计规范》中各设防水准的峰值加速度确定了对应的震级和震中距,进而根据地震动强度包线参数与震级和震中距关系计算地震动强度包线参数的取值,为基于强度包线函数生成人工地震动提供参考,并讨论了强度包线参数的取值规律:

(1) 随着设防烈度的提高,加速度时程曲线上上升段持续时间 t_1 和平稳段持续时间 t_s 减小,下降段衰减指数 c 增大;

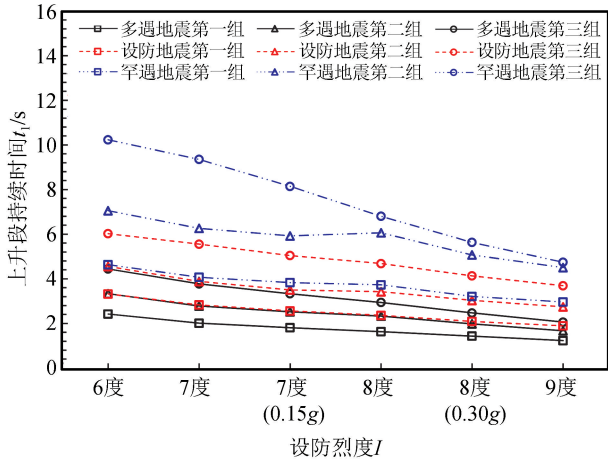


图 4 上升段持续时间 t_1 随设防烈度变化关系图

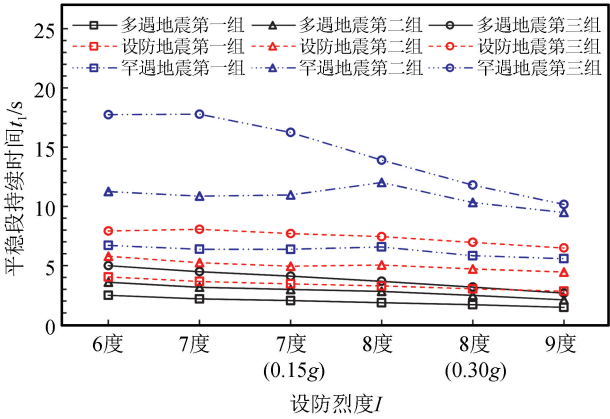


图 5 平稳段持续时间 t_s 随设防烈度变化关系图

Fig.5 The diagram of relationship with stable durations and design intensity

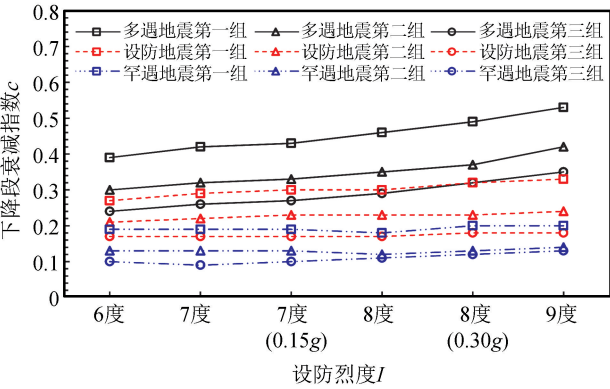


图 6 下降段衰减指数 c 随设防烈度变化关系图

Fig.6 The diagram of relationship between attenuation rate c and design intensity

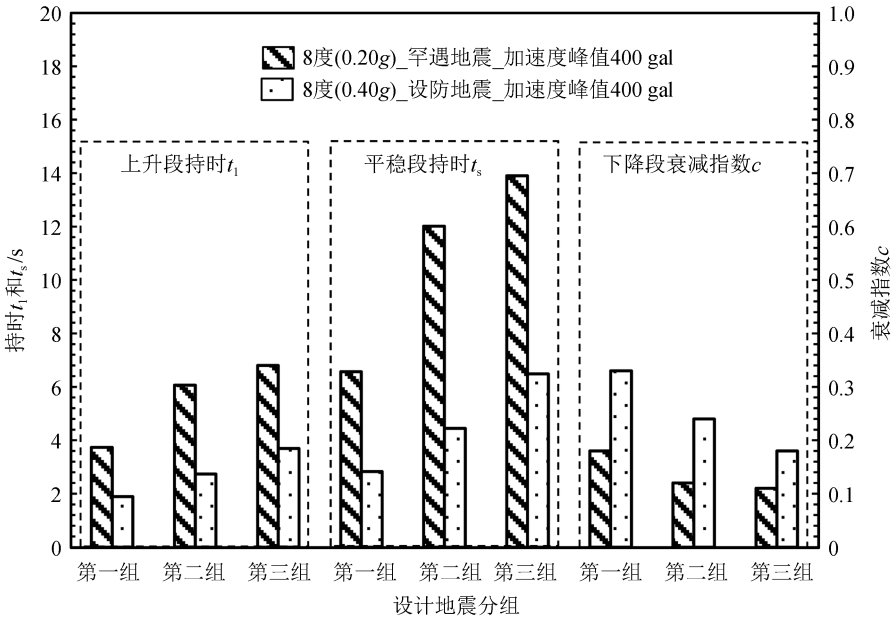


图 7 相同峰值加速度和设计地震分组强度包线参数对比图

Fig.7 Comparison between intensity envelope parameters with the same peak acceleration and seismic design group

(2) 随着地震水准和设计地震分组的提高,加速度时程曲线上升段持续时间 t_1 和平稳段持续时间 t_s 增加,下降段衰减指数 c 减小;

(3) 在生成人工地震动时,除考虑峰值和设计地震分组影响外,还需要考虑设防烈度影响。

参考文献(References)

- [1] 贾斌,罗晓群,张其林,等.粘滞阻尼器对空间结构的振动控制效应[J].地震工程学报,2014,36(1):39-46.
JIA Bin, LUO Xiaoqun, ZHANG Qilin, et al. Vibration control effect of viscous damper on space structure[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(1): 39-46.
- [2] 杨志勇,黄吉锋,邵弘.弹性与弹塑性动力时程分析方法中若干问题探讨[J].建筑结构学报,2009,30(增刊1):213-217.
YANG Zhiyong, HUANG Jifeng, SHAO Hong. Discussion on linear and nonlinear time history analysis method[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(Suppl01): 213-217.
- [3] 李慧,刘迪,杜永峰.近场多脉冲地震动作用下组合隔震结构抗震性能分析[J].地震工程学报,2013,35(3):563-568.
LI Hui, LIU Di, DU Yongfeng. The seismic behavior analysis of near-field multi pulse ground motion on composite isolated structure[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 563-568.
- [4] 余文正,陶忠,潘文,等.隔震结构等效线性化计算方法对比研究[J].建筑结构学报,2018,39(1):78-87.
YU Wenzheng, TAO Zhong, PAN Wen, et al. Comparative study on equivalent linearization calculation method in design of seismic isolated structure[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(1): 78-87.
- [5] 程永锋,刘振林,汤华,等.复合外套型特高压交流 CVT 抗震与减震试验研究[J].地震工程学报,2018,40(2):191-197.
CHENG Yongfeng, LIU Zhenlin, TANG Hua, et al. Experimental study on the seismic performance of polymeric-housed UHVAC capacitor voltage transformers[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(2): 191-197.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.水工建筑物抗震设计标准:GB 51247—2018[S].北京:中国计划出版社,2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for seismic design of hydraulic structures: GB 51247—2018[S]. Beijing: China Planning Press, 2018.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.核电厂抗震设计标准:GB 50267—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for seismic design of nuclear power plants: GB 50267—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [8] 郝明辉,王珊,张郁山.峰值速度对单自由度体系地震反应的影响分析[J].地震工程与工程振动,2016,36(6):120-132.
HAO Minghui, WANG Shan, ZHANG Yushan. Influence of ground-motion peak velocity on non-linear dynamic response of single-degree-of-freedom system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2016, 36(6): 120-132.
- [9] 韩建平,孙小云,周颖.基于规范谱拟合的人工地震动持时对 RC 框架结构抗倒塌能力影响[J].建筑结构学报,2016,37(7):121-126.
HAN Jianping, SUN Xiaoyun, ZHOU Ying. Effect of code-spectrum-matched artificial ground motion duration on collapse resistance capacity of RC frame[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(7): 121-126.
- [10] 余文正.隔震结构等效线性化设计方法及应用研究[D].昆明:昆明理工大学,2018.
YU Wenzheng. Study on equivalent linearization method in design and application of seismic isolated structure[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.
- [11] 石晟,杜东升,王曙光,等.基于高斯函数的完全非平稳地震动多峰模型及其应用[J].建筑结构学报,2020,41(5):198-206.
SHI Sheng, DU Dongsheng, WANG Shuguang, et al. Gaussian function based evolutionary power spectral density model for fully non-stationary seismic waves and application[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(5): 198-206.
- [12] 徐国栋,周锡元,史培军.基于功率谱的三参量人工地震动合成[J].建筑结构学报,2010,31(9):111-118.
XU Guodong, ZHOU Xiyuan, SHI Peijun. Artificial ground motion using three statistics based on power spectrum[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(9): 111-118.
- [13] 霍俊荣,胡丰贤,冯启民.地面运动时程强度包络函数的研究[J].地震工程与工程振动,1991,11(1):1-12.
HUO Junrong, HU Yuxian, FENG Qimin. Study on envelope function of acceleration time history[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1991, 11(1): 1-12.
- [14] 屈铁军,王君杰,王前信.局部场地上地震动的强度包络函数的特性研究[J].地震工程与工程振动,1994,14(3):68-80.
QU Tiejun, WANG Junjie, WANG Qianxin. Study on characteristics of envelope function of ground motion in local site[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1994, 14(3): 68-80.
- [15] 钟菊芳,胡晓,屈铁军,等.竖向地震动强度包络函数的空间变化规律[J].西北地震学报,2005,27(1):42-46.
ZHONG Jufang, HU Xiao, QU Tiejun, et al. Study on spatial variabilities of envelope function of vertical ground motion[J]. Northwestern Seismological Journal, 2005, 27(1): 42-46.
- [16] 董银峰,陈顺,李旭鹏.2011 年东日本大地震记录强度包线研究[J].土木工程学报,2013,46(增刊1):134-138.
DONG Yinfeng, CHEN Shun, LI Xupeng. Envelope of ground motions from the 2011 Tohoku earthquake in Japan[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(suppl01): 134-138.
- [17] 林建生,陈俊峰,林子健,等.场地地震安全评价中确定设计地震动参数方面若干问题的研究[J].世界地震工程,2006,22(4):150-159.
LIN Jiansheng, CHEN Junfeng, LIN Zijian, et al. Study on some problems in defining design ground motion parameters of seismic safety evaluation for engineering sites[J]. World

- Earthquake Engineering, 2006, 22(4): 150-159.
- [18] 肖亮. 水平向基岩强地面运动参数衰减关系研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2011.
- XIAO Liang. Study on attenuation relationships of horizontal ground motion parameters near the source of rock site[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2011.
- [19] 张美玲, 李山有, 卢建旗, 等. 中国大陆地区地震动时程强度包络函数研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(4): 60-70.
- ZHANG Meiling, LI Shanyou, LU Jianqi, et al. The study in time history envelop function of ground motion in Mainland of China[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(4): 60-70.
- [20] 董娣. 地震动特性的影响因素与不确定性分析[D]. 北京: 北京工业大学, 2006.
- DONG Di. The effect factors and uncertainty analysis of ground motion characteristic[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006.
- [21] 董银峰. 非平稳信号处理方法的改进及在地震工程中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- DONG Yinfeng. Improvements on non-stationary signal processing methods and their applications in earthquake engineering[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [22] 李英民, 赖明, 白绍良. 三维地震动强度非平稳特性的相关性研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2000, 22(增刊1): 67-73.
- LI Yingmin, LAI Ming, BAI Shaoliang. A study on correlativity of the characteristics of non-stationary intensity of 3-D earthquake ground motions[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2000, 22(suppl01): 67-73.
- [23] 曹国安, 张鸿儒. 地震动强度包络函数模型[J]. 北方交通大学学报, 1998, 22(1): 29-33, 38.
- CAO Guoan, ZHONG Hongru. Envelope function model of earthquake intensity[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 1998, 22(1): 29-33, 38.
- [24] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Seismic ground motion parameters zonation map of China: GB 18306—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [26] 高孟潭. 《中国地震动参数区划图(GB 18306—2015)》宣贯教材[M]. 北京: 中国标准出版社, 中国质检出版社, 2015.
- GAO Mentan. Chinese ground motion intensity measures zoning map publicity materials (GB18306—2015)[M]. Beijing: Standards Press of China Zhijian Publishing House, 2015.
- [27] 王亚勇. GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》和 GB 18306—2015《地震动参数区划图》反应谱对比及地震动峰值加速度应用研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(2): 1-6.
- WANG Yayong. Comparison of acceleration response spectra between GB 50011—2010 'Code for seismic design of buildings' and GB 18306—2015 'Seismic ground motion parameter zonation map of China' and studies on peak accelerations of earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(2): 1-6.